

УДК 621.317

## ОПТИМІЗАЦІЯ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК АКТИВНИХ ІМІТАТОРІВ ОПОРУ

**М.М. Микийчук**

*Національний університет "Львівська політехніка", вул. С. Бандери 12, м. Львів, 79013,  
e-mail: [mykolamm@ukr.net](mailto:mykolamm@ukr.net)*

*Розглянуто шляхи оптимізації характеристик активних імітаторів опору при побудові ефективних калібраторів для оперативного контролю метрологічних характеристик промислових засобів вимірювання температури.*

*Ключові слова: активний імітатор опору, калібратор, похибка.*

*Рассмотрены пути оптимизации характеристик активных имитаторов сопротивления при построении эффективных калибраторов для оперативного контроля метрологических характеристик промышленных средств измерения температуры.*

*Ключевые слова: активный имитатор сопротивления, калибратор, погрешность.*

*The ways of optimization of descriptions of active imitators of resistance are considered at the construction of effective calibrators for operative control of metrology descriptions of industrial facilities of measuring of temperature.*

*Keywords: active imitator of resistance, calibrator, error.*

Вимірювання температури складають більшу частину всього об'єму вимірювань в промисловості [1-3]. Найбільш широко для вимірювання температури застосовуються контактні методи з використанням термоелектричних перетворювачів та термоперетворювачів опору, питома вага яких в основних галузях промисловості складає майже 80 % [2]. Тому якість температурних вимірювань з використанням методів контактної термометрії в значній мірі обумовлює результати промислового виробництва.

Ефективність контактних методів вимірювання температури в промисловості визначаються метрологічною надійністю вторинних засобів вимірювання температури (ВЗВТ), які вимірюють вихідні сигнали первинних перетворювачів температури. Характерною особливістю застосування сучасних вторинних засобів вимірювання температури є той факт, що поряд з кількісним ростом відбувається розширення їх функціональних можливостей, що зумовлює посилення впливу на процеси, які вони контролюють. В цих умовах значно зростає відповідальність за результат їх роботи і гостро постає проблема правильної експлуатації ВЗВТ [3-5].

Важливим фактором, що визначає ефективність промислових ЗВ, є наявність

продуктивних калібраторів сигналів первинних перетворювачів [4,5].

Найбільш перспективним шляхом створення спеціалізованих промислових калібраторів є використання для їх побудови активних імітаторів опору (АІО) [4,6]. Використання АІО відкриває широкі можливості оптимізації параметрів створюваних калібраторів. Основними перевагами використання АІО для побудови калібраторів перед традиційними методами можна назвати такі: можливість реалізації кодокерованих мір опору з малою дискретністю (менше 0,001 Ом) при забезпеченні потрібної для перевірки ВЗВТ похибки та використанні мінімальної кількості зразкових (дорогих) елементів, простота реалізації на їх базі калібраторів інших фізичних величин (напруги, струму, ємності, індуктивності).

Широке впровадження калібраторів в процес контролю технологічних процесів дозволить зменшити втрати від браку продукції оскільки дозволить оперативно виявляти відхилення похибок промислових ЗВ від встановлених меж.

Необхідною умовою широкого впровадження промислових калібраторів є оптимізація їх структури з метою зменшення ціни та підвищення метрологічної надійності.

Критерієм ефективності промислових калібраторів доцільно обрати метрологічну ефективність - забезпечення потрібних

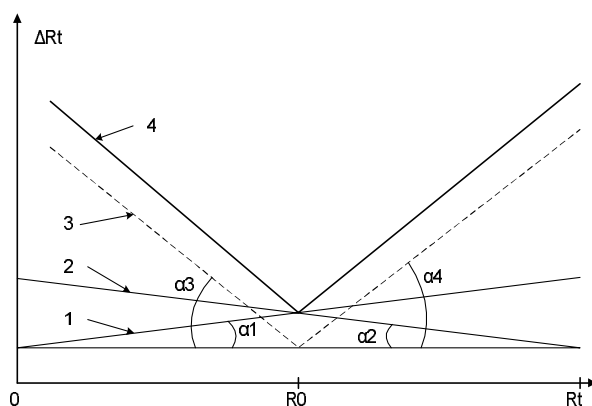
метрологічних характеристик при мінімальних затратах для їх досягнення. Критерій можна представити як функцію вартості калібратора від його основних метрологічних характеристик:

$$C_i = f(\Delta_i, h_i, D_i, \dots), \quad (1)$$

де  $C_i$  – вартість калібратора;  $\Delta_i, h_i, D_i$  – похибка, дискретність та діапазон відтворення калібратора, відповідно.

Зрозуміло, що практичне застосування вибраного критерію внаслідок труднощів у визначенні ціни конкретного варіанту калібратора в багатьох випадках може дати необ'єктивний результат. Тому на етапі структурного синтезу достатньо використовувати спрощений варіант, наприклад, здійснювати оптимізацію відносно найбільш "затратного" параметра калібратора. Найчастіше для ЗВ "найзатратнішим" параметром є його клас точності.

Як показують дослідження метрологічних характеристик ВЗВТ, що вимірюють сигнали термоперетворювача опору (ТО), залежність похибки вимірювання від значення опору ТО має специфічну властивість [6-8] (рис. 1).



**Рисунок 1 – Залежність абсолютної похибки вимірювання ВЗВТ від опору  $R_t$**

Ця властивість полягає в тому, що значення похибки вимірювання опору ТО має мінімальне значення при  $0^\circ\text{C}$ , тобто при  $R_0$ , та зростає при зміні опору ТО (як при зменшенні його опору, так і при збільшенні цього опору, рис.1). Приймаючи до уваги вказану властивість, сформулюємо першу основну вимогу до похибки мір опору для метрологічної перевірки ВЗВТ: забезпечення мінімального значення похибки відтворення опору при відтворенні значень опору близьких до  $R_0$ .

Існуючі магазини опору та АІО з функцією перетворення  $R_{im} = \mu R_n$  мають розподіл похибки згідно графіка 1, для АІО з функцією перетворення  $R_{im} = (1 - \mu) R_n$  похибка обмежена кривою 2 (рис. 1). Ці структури при реалізації на їх основі калібраторів сигналів ТО не забезпечують основної вимоги до похибки мір опору для перевірки ВЗВТ: забезпечення мінімального значення похибки відтворення опору при відтворенні значень опору близьких до  $R_0$  та вимагає використання елементів зі значною метрологічною надлишковістю, зокрема, 18...20 розрядних калібраторів постійної напруги (КПН) та прецизійних резисторів з похибкою підгонки 0,002 %. Отже калібратори сигналів ТО побудовані на основі існуючих кодокерів мір електричного опору не будуть ефективними для перевірки термометричних ЗВ.

Важливою проблемою синтезу схеми калібратора сигналів ТО є поділ всього діапазону відтворення вхідних сигналів ВЗВТ на піддіапазони. Зрозуміло, що основною вимогою при цьому є забезпечення оптимального погодження похибок калібратора та ВЗВТ. Оптимального погодження можна досягнути, якщо піддіапазон відтворення опору буде відповідати діапазону зміни опору ТО одного градуювання при забезпеченні оптимальної згідно рис. 1 залежності похибки відтворення опору від значення відтворюваного опору.

Для відтворення вихідних сигналів ТО, з якими працює основна маса промислових ВЗВТ, необхідно відтворювати номінально-статичні характеристики ТО [73]: -  $R_0 = 10 \text{ Ом}$ ,  $R_0 = 50 \text{ Ом}$ ,  $R_0 = 100 \text{ Ом}$ ,  $R_0 = 500 \text{ Ом}$ .

Структурний аналіз показав, що найкраще вказаним вимогам відповідає структура АІО, яка представлена на рис.2.

Функція перетворення такого АІО буде мати вид:

$$R_{im} = k_{A1}(1 \pm \mu(N))k_{A2}R_n. \quad (2)$$

В цій структурі  $R_n$  виконують у вигляді мультирезистора із значеннями опорів, рівними значенню опору ТО відповідного градуювання при температурі  $0^\circ\text{C}$ . КПН побудований по перемножувальній схемі з можливістю інвертування вихідної напруги. Коло зворотного зв'язку підсилювача А1 побудовано таким чином, що дозволяє вмикати його в режимі повторювача напруги або в режимі

неінвертуючого підсилювача з коефіцієнтом підсилення  $k_{A1}=5$ .

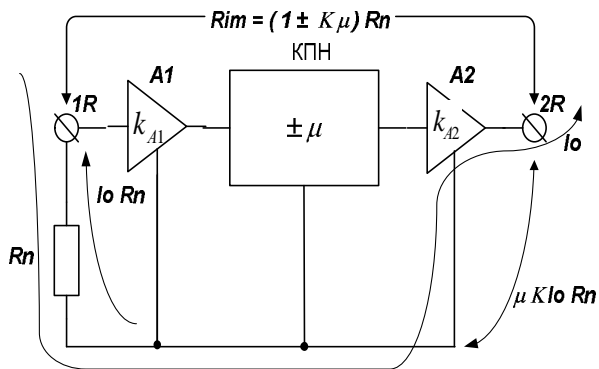


Рисунок 2 – Структурна схема АІО для відтворення сигналів ТО

Схема працює наступним чином. Для відтворення опору в діапазоні від 0 до  $R_0$  в мультирезисторі встановлюється опір  $R_n = R_{TO}(0^\circ\text{C})$  потрібного градування, підсилювач А1 вмикається в режим повторювача напруги, а КПН переводиться в режим  $+\mu(N)$ . Змінюючи коефіцієнт поділу КПН від 0 до 1, можна відтворювати опір від 0 Ом до  $R_{TO}(0^\circ\text{C})$  Ом. Для відтворення опору в діапазоні від  $R_0$  до  $2R_0$  КПН переводиться в режим  $-\mu(N)$ . Для відтворення опору в діапазоні від  $R_0$  до  $5R_0$  підсилювач А1 вмикається в режим неінвертуючого підсилювача з  $k_{A1}=5$ .

Таким чином, з мінімальними змінами структури АІО можна відтворювати сигнали всіх існуючих ТО при забезпеченні оптимального погодження його похибки згідно наведених вище вимог (рис. 1).

Проаналізуємо метрологічні властивості запропонованої структури АІО з точки зору відповідності їх метрологічних характеристик сформульованим вимогам. Для цього замінімо ідеальні вирази коефіцієнтів, що визначають функцію перетворення АІО, їх моделями, які ураховують основні параметри неідеальності реальних елементів. Опір однозначної міри опору  $R_{nr}$  виражається як сума відхилення  $\Delta R_n$  та його номінального значення  $R_n$ , тобто:

$$R_{nr} = R_n + \Delta R_n. \quad (3)$$

Похибка підсилювача А1 буде визначатися відхиленням коефіцієнту підсилення від номінального значення:

$$k_{A1r} = k_{A1} + \Delta k_{A1}. \quad (4)$$

Похибка КПН, як правило, характеризується двочленною моделлю, тому реальний коефіцієнт його перетворення  $\mu_p$  можна представити так:

$$\mu_p = \mu + \Delta_{0\mu} + \delta_{S\mu}\mu \quad (5)$$

де  $\Delta_{0\mu}, \delta_{S\mu}\mu$  – адитивна та мультиплікативна складові похибки КПН.

Аналіз показує, що адитивна похибка КПН складається з похибки квантування вхідної напруги та диференційної нелінійності. Коефіцієнт при мультиплікативній складовій похибки складається з похибки підгонки коефіцієнта перетворення КПН та його інтегральної нелінійності.

Якщо похибку АІО нормувати двочленною моделлю виду

$$\Delta R_{im} = \Delta_{0R} + \delta_{SR} R_{im}, \quad (6)$$

то після математичних перетворень ідеального та реального виразів функцій перетворення АІО отримаємо наступний вираз для його абсолютної похибки відтворення опору:

$$\Delta R_{iml} = (\Delta_{0\mu} + \delta_{S\mu}) R_n + \left[ \delta_{S\mu} + \frac{\Delta R_n}{R_n} + \frac{\Delta k_{A1}}{k_{A1}} \right] R_{im}. \quad (7)$$

З цього виразу можна зробити висновок, що адитивна складова похибки АІО визначається похибками перетворення КПН та значенням мультирезистора, а мультиплікативна складова похибки залежить від точності підгонки зразкового мультирезистора, коефіцієнта підсилення підсилювача А1 та інтегральної нелінійності КПН.

Найкраще погодження з похибкою ВЗВТ досягається при забезпеченні розподілу похибки калібруатора сигналів ТО згідно кривої (рис. 1). Вимоги до похибок основних структурних вузлів АІО можна встановити, знаючи вимоги до його адитивної та мультиплікативної складових похибок, які досить просто визначити з наступних виразів.

Адитивну похибку АІО можна знайти із наступної залежності:

$$\Delta_{0R} = \Delta_{R0} / 5, \quad (8)$$

де  $\Delta_{0R}$  – допустима адитивна похибка калібратора опору,  $\Delta_{R0}$  – значення похибки ВЗВТ при опорі ТО рівному  $R_0$ ;

При цьому значення коефіцієнта при мультиплікативній складовій похибки калібратора сигналів ТО визначається виразами:

$$\delta_s^- = \frac{tg\alpha_3}{5} = \frac{\Delta_{R_{\min}} - \Delta_{R0}}{5(R_0 - R_{\min})} \quad (9)$$

для діапазону  $0 \dots R_0$  ( $-\Theta \dots 0^\circ\text{C}$ ),

$$\delta_s^+ = \frac{tg\alpha_4}{5} = \frac{\Delta_{R_{\max}} - \Delta_{R0}}{5(R_{\min} - R_0)} \quad (10)$$

для діапазону  $R_0 \dots R_{\max}$  ( $0^\circ\text{C} \dots +\Theta$ ),

де  $\Delta R_{\min}$ ,  $\Delta R_{\max}$ ,  $\Delta R_0$  – значення похибки ВЗВТ, відповідно для мінімального, максимального опорів ТО та при опорі ТО, рівному  $R_0$ ;  $R_0$  – значення опорів ТО відповідного градування при  $0^\circ\text{C}$ ;  $R_{\max}$  – максимальне значення опорів ТО;  $\Theta$  – температура, якій відповідає опір ТО.

Розрахунки показують, що погодження метрологічних характеристик калібратора опорів з метрологічними характеристиками ВЗВТ дозволяє зменшити вимоги до похибок КПН і зразкового резистора.

## ВИСНОВКИ

Оптимальне погодження параметрів АЮ з метрологічними характеристиками калібратора дозволить значно знизити вимоги до параметрів, а отже і ціни елементів, що використовуються для його виготовлення при збереженні необхідних для калібрування ВЗВТ метрологічних характеристик. Створення промислових калібраторів з можливістю програмування споживачем їх функцій для перевірки конкретних ВЗВТ в умовах їх експлуатації дозволить значно підвищити ефективність метрологічного забезпечення температурних вимірювань.

1. Куритный И.П. Современное состояние термопреобразователей сопротивления: обзорная информация ТС-5 «Электроизмерительные приборы, геофизические и гидрометеорологические приборы» / И.П. Куритный, С.А. Горева // ЦНИИТЭИ приборостроения. – 1985. – Вып. 6. – с.45. 2. Кюзенди О.А. Комплексные исследования и разработка приборов и схем для измерения температуры контактным методом с повышенной точностью и надежностью: дисс ... канд. техн. наук: спец. 05.11.04./ О.А.Кюзенди. – Львов, 1971. – 205 с. 3. Микийчук М.М. Шляхи вдосконалення метрологічного забезпечення вимірювання температури: збірник праць четвертої міжн. наук.-техн. конф. «Контроль і управління в технічних системах - КУТС - 97». – Вінниця, 1997. 4. Конюхов А.Г. Автоматизация поверки: старые подходы и перспективные принципы / А.Г.Конюхов // Измерительная техника. – 1987.-№11.-С.14-15. 5. Бархатов Т.Н. Автоматизация испытаний измерительных преобразователей температуры /Т.Н. Бархатов, Б.И. Васильев, Г.М. Жилинская // Контрольно-измерительная техника. – Львов, 1984. – Вып.36. –С.90-96. 6. Шморгул Э.И. О возможности использования активных имитаторов сопротивления для поверки средств измерения температуры /Э.И. Шморгул, Я.В. Пацарнюк // Вестник Львовского политехнического института. – 1988. - №229. – С.61-66. 7. Приборы и методы температурных измерений / общ ред. Б.Н. Олейник. – М.: Изд-во стандартов, 1987 – 296 с.. 8. Микийчук М.М. Оцінка ефективності засобів метрологічного забезпечення. / М.М. Микийчук, П.Г.Столярчук ; матеріали третьої міжн. наук.- конф.і «СІЕТ-98», Кам'янець-Подільський, 2-6 червня 1998 р. – Том 5 – С.51-54.

Поступила в редакцію 15.04.2010 р.

Рекомендував до друку докт. техн. наук,  
проф. Походило Є.В.